УДК 621.382

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

В.Н. Давыдов, П.Е. Троян, Н.Г. Зайцев, С.В. Беляев

Томский университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: kolan317_1@mail.ru

Разработан автоматизированный комплекс для исследования свойств полупроводниковых структур, позволяющий измерять широкий набор их электрофизических и фотоэлектрических характеристик за счет применения доработанных авторами измерительных методик, схемотехнических и конструкторско-технологических решений. По сравнению с известными аналогами комплекс позволяет измерять более широкий набор параметров структур с более высокой точностью. При этом повышена долговременная стабильность измерений и независимость результатов измерений от температуры и влажности окружающей среды.

Введение

В настоящее время для исследования свойств полупроводниковых структур, в том числе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), разработано большое количество методик и устройств, которые их реализуют [1, 2]. Многие из этих устройств не позволяют автоматизировать процесс измерения, что приводит к большим временным затратам и трудоемкости. Устройства, которые позволяют это сделать, как правило, обладают низкой точностью или высокой стоимостью. Эти обстоятельства вынуждают разрабатывать новые методики и средства измерения параметров полупроводниковых структур с использованием средств автоматизации. Разработанный ранее автоматизированный комплекс [3] позволяет производить измерения набора электрофизических и шумовых параметров полупроводниковых структур, однако использованные для его реализации измерительные методики и их схемотехнические решения обладают низкой временной стабильностью, высокой чувствительностью к состоянию окружающей атмосферы и невысокой точностью измерения электрических величин.

Целью данной работы является расширение метрологических возможностей автоматизированного комплекса, повышение долговременной стабильности и воспроизводимости результатов измерений электрофизических и фотоэлектрических параметров полупроводниковых структур.

1. Структурная схема автоматизированного комплекса

Разработанный комплекс состоит из двух блоков: блока преобразования физических параметров в электрические, а так же цифрового блока, рис. 1. В первом блоке на аппаратном уровне реализованы принципы измерения параметров, а также устройство коммутации измерительных и тестовых сигналов. Цифровой блок обеспечивает преобразование исследуемых сигналов из аналоговой формы в цифровую и наоборот. Оцифрованная информация далее поступает на ЭВМ по стандартному интерфейсу, где обрабатывается программой управления и обработки данных.



Рис. 1. *Внешний вид автоматизированного комплекса*

2. Структурная схема блока преобразования параметров

Блок преобразования физических характеристик в электрические состоит из модулей: программируемого генератора тестового сигнала, блоков измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ), вольт-амперных характеристик (ВАХ), фотоЭДС и модуля коммутации аналоговых сигналов. В дополнение в модуле ВФХ проводится измерение разности фаз сигнала относительно тестового, что позволяет дополнительно определять вольт-сименсные характеристики полупроводниковых структур. Структурная схема устройства приведена на рис. 2. Конструктивно данный блок собран в контейнере, предназначенном для быстрой замены жестких дисков ЭВМ.

2.1. Генератор тестового сигнала

Генератор тестового сигнала собран на основе микросхемы AD9832. Он позволяет генерировать синусоидальные колебания амплитудой 0,7 В. Частота колебаний может программно изменяться в широком диапазоне: от 1 Гц до 1 МГц. Управление работой генератора осуществляется выходным регистром цифрового блока по последовательному интерфейсу SPI.

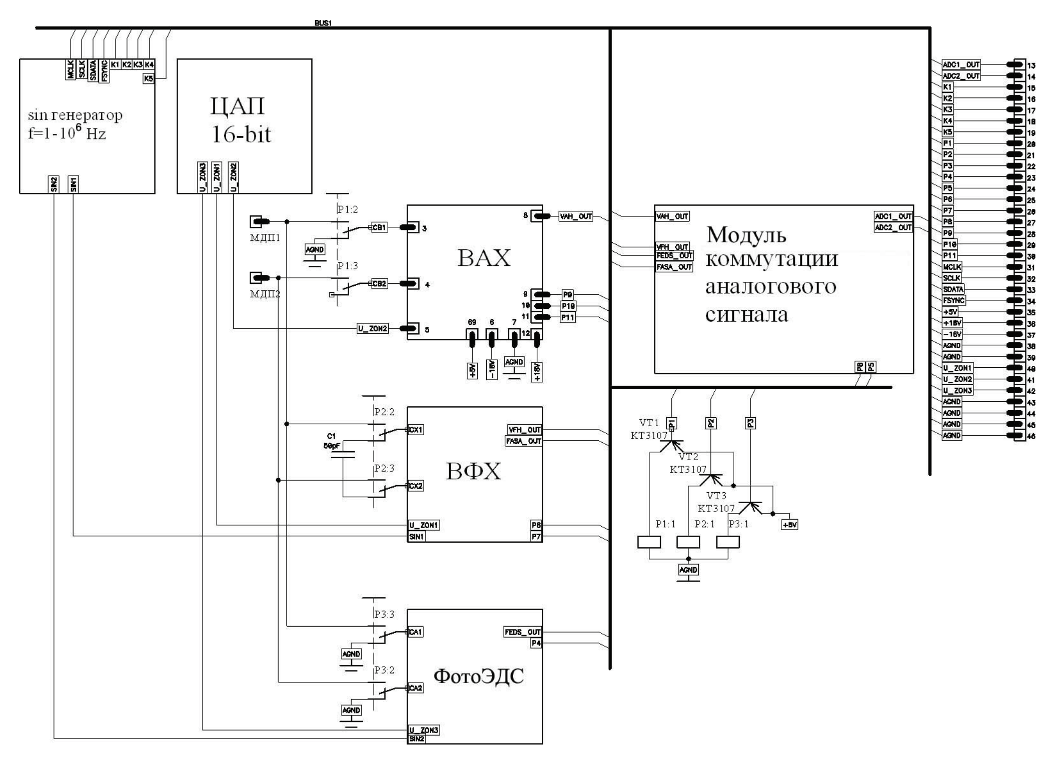


Рис. 2. *Структурная схема блока преобразования параметров*

2.2. Модуль измерения ВФХ

В отличие от ранее использовавшихся методик измерения емкости [1, 2] в данном комплексе применена разработанная авторами методика, использующая свойства дифференцирующего усилителя [4]. В отличие от мостовых схем и схемы емкостного делителя, применение дифференцирующего усилителя дает линейную зависимость выходного напряжения от значения измеряемой емкости, что принципиально повышает точность измерения этого параметра. Другим преимуществом используемого схемотехнического решения является также и то, что оно позволяет снизить уровни шумов и неизбежных наводок, которые имеют место в других схемотехнических решениях.

Кроме схемы измерения емкости полупроводниковых структур, в модуле измерении ВФХ собран измеритель разности фаз между измеряемым сигналом и тестовым, принцип определения разности фаз основан на методе трех амплитуд [5].

Модуль имеет три диапазона измерений: 0,5...60, 60...280, 280...4000 пФ. Относительная погрешность на пределах измерения не превышает 1, 0,5, 0,5 %, соответственно. Погрешность измерения разности фаз не превышает 1°.

2.3. Модуль измерения ВАХ

Принцип работы модуля основан на измерении падения постоянного напряжения, возникающего на эталонном сопротивлении, включенном последовательно с измеряемой МДП-структурой. Принципиальное ограничение измерения нижнего порога измеряемого тока задается величиной входного тока входного каскада модуля ВАХ. Применение микросхемы OP97 в качестве операционного усилителя, а также использование коммутационных элементов позволило в несколько раз по сравнению с [3] снизить величину минимально регистрируемого тока и расширить пределы измерения: 10...20000 пА, 20...600 нА при погрешности измерения не выше 1 %.

2.4. Модуль измерения фотоЭДС

Модуль собран по схеме резистивно-емкостного делителя, в котором исследуемая полупроводниковая структура является источником тока, генерируемого за счет освещения модулированным излучением. Использование малошумящих микросхем AD797, AD818, применение оптимальной топологии платы, а также экранировка входной цепи позволили достичь регистрируемого значения фотоЭДС равного десяткам мкВ. В качестве источника тестового излучения использован GaAs светодиод с длиной волны излучения 0,92 мкм при мощности оптического излучения около 1 мВт на удалении 1 см. Модулированное излучение светодиода получено за счет подачи на него синусоидального сигнала амплитудой 0,7 В и частотой 30 Гц ... 100 кГц с подпиткой постоянным током. Точность измерения фотоЭДС не хуже 1 %.

2.5. Модуль коммутации аналогового сигнала

Модуль включает схему оконечного усилителя сигнала, его квадратичного детектирования и схему коммутации измеряемого сигнала с выходов модулей ВФХ, фотоЭДС, измерителя разности фаз.

3. Цифровой блок

Цифровой блок имеет в своем составе микропроцессор (CPU) для обработки приходящих данных и управления процессом измерения. В состав цифрового блока также входят 4 дифференциальных канала для измерения напряжения, 24-х разрядный сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь (АЦП), позволяющий измерять напряжения в диапазоне –10...+10 В с высокой точностью и скоростью преобразования 15 изм./с, встроенный 16-и разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), имеющий 10 независимых аналоговых выходов и позволяющий программно задавать напряжения в диапазоне –10...+10 В с высокой точностью. Кроме того, блок содержит 8 портов ввода/вывода (I/O), которые применяются для управления процессами коммутации и переключения пределов при измерении полупроводниковой структуры, и встроенный последовательный интерфейс SPI для управления генератором синусоидального сигнала. Для связи цифрового блока с ЭВМ используется порт RS-232. Скорость обмена данными составляет 57600 бит/с. Структурная схема цифрового блока показана на рис. 3.

4. Интерфейс пользователя

Для обслуживания и управления автоматизированным комплексом требуется программа управления. Поскольку в комплекс встроен последовательный интерфейс RS-232, то программа должна уметь обращаться к портам ввода/вывода ЭВМ. В разработке программы управления использовалась среда разработки Delphi 7.0. Так как в компиляторе Delphi не предусмотрены функции обращения к портам ввода/вывода компьютера, то необходимо их писать самостоятельно на ассемблере. В результате программа получится громоздкой. При запуске программы в операционных системах Windows NT/2000/XP потребуются дополнительные меры для обхода запрета, налагаемого операционной системой на прямые обращения к портам ввода/вывода ЭВМ. По этой причине непосредственное обращение, без которого нельзя было обойтись на компьютерах под управлением DOS, использовать в приложениях под операционной системой Windows нецелесообразно.

При разработке приложения в Delphi для управления портом RS-232 можно обращаться к портам ввода/вывода с помощью вызова функций операционной системы (Windows API) или готовых компонентов (например, VaComm). Однако преимущества WinAPI очевидны: обращение к функциям остается одинаковым независимо от того, где написано приложение (в Delphi или в C++), программа может работать, а также редактироваться без использования дополнительных надстроек в виде нестандартных компонентов.

4.1. Функции WinAPI для управления автоматизированным комплексом

В программе для связи с автоматизированным комплексом применены коммуникационные функции WinAPI. При помощи функции CommConfigDialog возможно в диалоговом режиме выбрать номер COM порта и задать его свойства. Фактически эта функция запоминает определяемую конфигурацию COM порта и заносит ее в переменную LPCOMMCONFIG. Функция CreateFile, открывает выбранный порт и определяет режим чтения. Возможно только чтение, только запись и чтение/запись. Если выбранный порт существует и не занят, то он открывается и для обращения к нему создается идентификатор. Фактически эта API функция аналогична функции создания файлов в компиляторе Delphi. Для передачи выбранному COM порту ранее сконфигурированных свойств в функции CommConfigDialog применяется функция SetCommConfig, которая переносит информацию из переменной LPCOMMCONFIG в свойства открытого COM порта. При конфигурировании COM порта важно определять параметры таймаута, интервала времени, в течение которого происходи ввод или вывод данных. Это необходимо для того, чтобы программа не «зависала» при отсутствии данных. Иными словами, если принято меньше байт чем ожидалось, то при таймауте больше 0 программа по истечении указанного времени перейдет к выполнению следующей команды, идущей за функцией чтения (записи). Параметры таймаутов устанавливаются при помощи функции SetCommTimeouts.

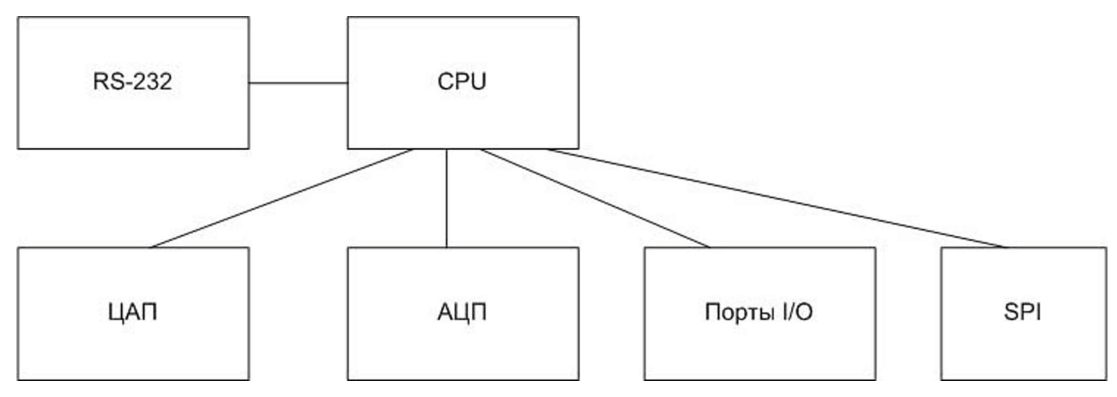


Рис. 3. *Структурная схема цифрового блока*

Перечисленные выше функции необходимы для открытия и конфигурирования COM порта. При закрытии приложения по управлению комплексом необходимо закрывать и COM порт. Эта операция осуществляется при помощи функции CloseHandle, которой передается идентификатор порта.

Для обращения к порту используют функции ReadFile (чтение данных) и WriteFile (запись данных). В обоих случаях необходимо указать идентификатор порта и количество принимаемых/передаваемых байт. Если в процессе конфигурирования порта были установлены таймауты, то по их истечении функции чтения/записи вернут число полученных/переданных байт и массив данных (в случае ReadFile).

4.2. Многопоточность

Для контроля результатов измерения на автоматизированном комплексе в реальном режиме времени, используется многопоточность. Это означает, что в программе применены свойства защищенного режима процессора, которые дают возможность выполнять несколько задач параллельно. Организация потоков выполнена при помощью классов TThread. После того, как будет открыт порт, функцией Create(False) запускаются процессы чтения и записи данных. В запущенных процессах осуществляется непрерывное выполнение кода, который позволяет конфигурировать параметры комплекса, передавать данные в ЦАП, АЦП и принимать информацию.

4.3. Пользовательский интерфейс

Пользовательский интерфейс выполнен на стандартной форме Delphi, рис. 4. Он позволяет:

- выбирать и конфигурировать открываемый COM порт;
- записывать в порт любую команду для автоматизированного комплекса;

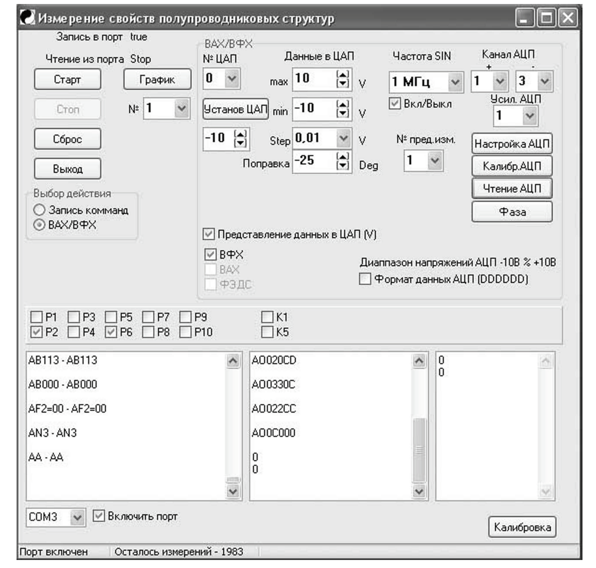


Рис. 4. Пользовательский интерфейс программы управления комплексом

- измерять ВФХ, ВАХ, фотоЭДС полупроводниковых приборов;
- коммутировать линии связи при помощи управляемых реле Р1-Р10 для задания режима измерения ВАХ, ВФХ и фотоЭДС.
- калибровать, читать, устанавливать формат принимаемых данных, выбирать канал измерения, коэффициент усиления по входу 24-х разрядного АЦП;
- устанавливать способ задания напряжения в виде напряжения или в виде кода, выбирать канал, записывать данные в 16-и разрядный ЦАП;
- управлять встроенным в комплекс генератором синусоидальных колебаний.

Кроме этого, во время измерения можно наблюдать процесс построения кривых на графике в реальном режиме времени (рис. 5).

В появившемся окне после окончания измерений данные можно сохранить в виде файла с данными, графического файла с расширением bmp или wmf, а также вывести результаты измерений на печать.

5. Технические характеристики разработанного автоматизированного комплекса

- Диапазон прикладываемого напряжения к МДП структуре – от –10 В до +10 В с шагом от 600 мкВ.
- Диапазон измеряемых емкостей – 0,5...4000 пФ.
- Диапазон измерения тока – 10...$6{\cdot}10^5$ пА.
- Диапазон измерения фотоЭДС – от 10 мкВ до ед. В.
- Диапазон изменения частоты модулированного излучения для измерения фотоЭДС – 30 Гц ... 100 кГц.
- Длина волны излучения GaAs светодиода – 0,92 мкм.
- Мощность излучения GaAs светодиода 1 мВт на удалении 1 см.
- Точность измерения на всех диапазонах – не хуже 1 %.
- Точность измерения разности фаз – не хуже 1°.

Заключение

В результате выполнения работы создан автоматизированный комплекс для измерения широкого набора электрофизических и фотоэлектрических параметров полупроводниковых структур, обладающий высокой точностью измерения, новыми метрологическими возможностями, высокой временной и температурной стабильностью.

В частности, для измерения ВФХ вместо широко используемой схемы емкостного делителя применена разработанная авторами схема измерения емкости на основе дифференцирующего усилителя. В результате этого повышена точность измерения и расширен диапазон измеряемых емкостей. Кроме этого, схема дополнена измерителем разности фаз между исследуемым и тестовым сигналами, что позволило по полученным данным исследовать вольт-сименсные характеристики структуры.

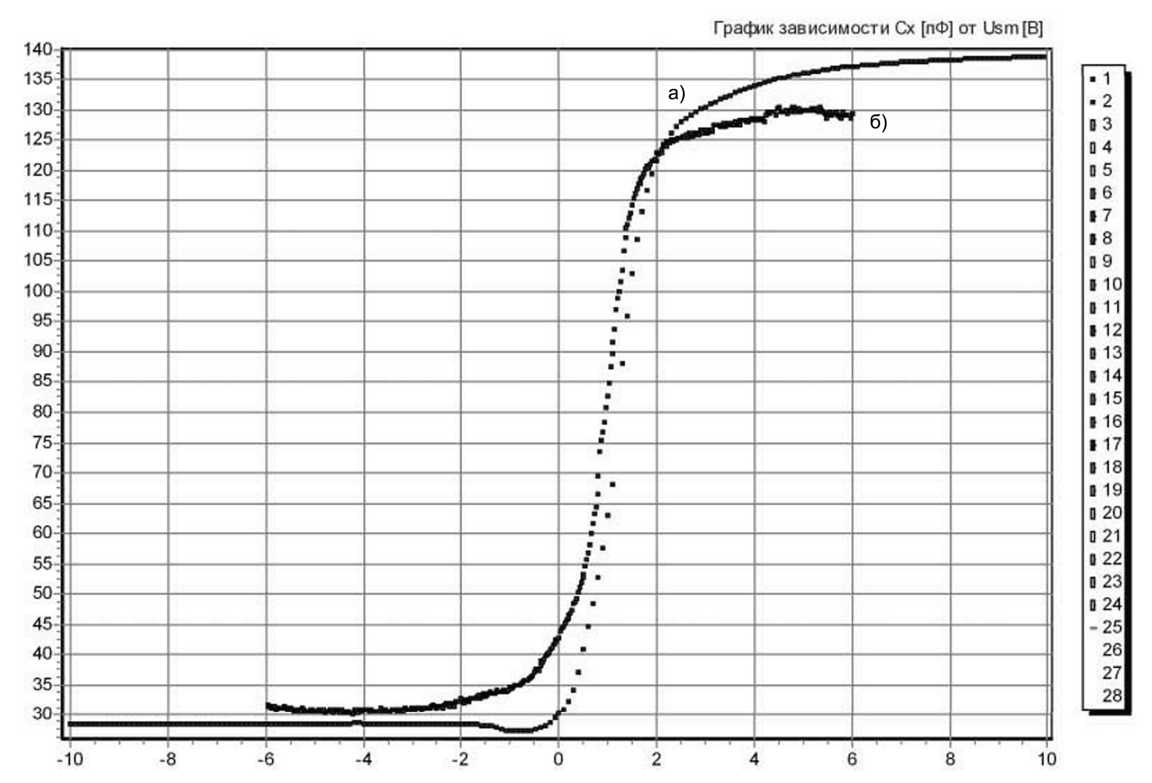


Рис. 5. *ВФХ, измеренная на: а) автоматизированном комплексе, б) ранее разработанном измерительном комплексе, точность измерения которого не превышает 5 %*

В схеме измерения ВАХ за счет уменьшения входного тока и методов подавления шумов уменьшено минимально измеряемое значение величины тока, повышена точность и воспроизводимость результатов измерения, их временная стабильность.

В состав автоматизированного комплекса добавлена методика измерения величины фотоЭДС в зависимости от приложенного напряжения к МДП-структуре и частоты модуляции светового потока, что позволило исследовать рекомбинационные свойства полупроводниковых структур, недоступные для исследования другими методами.

Разработан новый программный интерфейс пользователя, позволяющий оператору в наглядной форме контролировать и управлять сценарием измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурский Л.И., Сигалов Б.Л., Саенко Э.Ф., Олейник А.Т., Дениженко А.Г. Измеритель вольт-фарадных характеристик ИВФХ-2 // Приборы и техника эксперимента. – 1984. – № 5. – С. 231.
2. Пузин И.Б., Шерварлы Г.К., Нечкин С.Б. Измерение малых емкостей полупроводниковых приборов с помощью компенсационно-измерительного 2Т-моста // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 1. – С. 112–114.
3. Беляев С.В., Давыдов В.Н., Зайцев Н.Г. Измерительные возможности автоматизированного комплекса «МЕТРОНОМ-2» // Научная сессия ТУСУР-2006: Матер. Всеросс. конф. – Томск, 2006. – Ч. 4. – С. 12–15.
4. Давыдов В.Н., Троян П.Е., Зайцев Н.Г. Измерение емкости МДП-структуры с помощью дифференцирующего усилителя // Научная сессия ТУСУР-2006: Матер. Всеросс. конф. – Томск, 2006. – Ч. 4. – С. 77–80.
5. Давыдов В.Н., Троян П.Е., Зайцев Н.Г. Измерение импеданса МДП-структуры // Научная сессия ТУСУР-2006: Матер. Всеросс. конф. – Томск, 2006. – Ч. 4. – С. 81–83.